

INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN MINERAL DE ROCAS ARCILLOSAS EN LA ESTABILIDAD DE POZOS PETROLEROS

Amorocho P. R.¹; Juan Badillo²

RESUMEN

En la industria petrolera, durante la operación de perforación de un pozo, los costos pueden aumentar entre el 10 y 15% del presupuesto inicial, si la composición de las formaciones perforadas es arcillosa. Para disminuir este problema, la industria ha invertido mucho dinero en investigación, para desarrollar mecanismos que brinden mayor control y estabilidad en estas formaciones durante la perforación. Estudios realizados y publicados por la *Society Petroleum Engineer* (SPE), muestran que los principales efectos químicos que están involucrados en la interacción fluido de perforación - formación arcillosa son: 1) ósmosis química; y 2) esfuerzos de hidratación. Aunque, existen otros como: efectos capilares, deshidratación, desbalance de presiones e intercambio catiónico. Estos factores generalmente no se presentan de forma independiente. En el piedemonte llanero el problema de inestabilidad de pozos representa un gran costo para las compañías petroleras, debido a que en este sector del país intervienen no sólo los factores químicos generados entre la interacción fluido/roca, también factores mecánicos como resultado del régimen de esfuerzos. Se realizaron pruebas de *Metil Blue Testing* (MBT) y Difracción de Rayos X (DR-X), en muestras de lodos tomados de ripios extraídos de pozos perforados en algunos sectores del piedemonte y los llanos orientales colombianos. Se encontró en estas muestras un moderado contenido de minerales arcillosos reactivos y bajo contenido de minerales propensos a sufrir hinchamiento. El componente principal en las muestras es caolinita, lo cual hace que la roca sea poco hidratable, pero este tipo de mineral genera dispersión de las paredes del pozo y por lo tanto derrumbes. Sin embargo, se deben realizar más pruebas de laboratorio para cuantificar los daños y evaluar su influencia dentro de los posibles cambios dentro del régimen de esfuerzos durante la perforación.

Palabras Clave: Pozos petroleros, Inestabilidad, Minerales arcillosos, Piedemonte llanero.

INFLUENCE OF THE MINERAL COMPOSITION OF CLAY ROCKS IN THE WELLBORE STABILITY

ABSTRACT

In the oil companies, the operation of drilling wellbore could be more expensive if the composition of the rocks is clay, the cost could increase between 10 and 15% from the starting budget. In order to decrease this problem, the oil industry has spent too much money for developing mechanisms that can provide better control and stability in clay formations during the drilling. The Society Petroleum Engineers (SPE) in some researches have published that the main chemical effects that are involved in the interaction of perforation fluids and the clay formation are: 1) chemical osmosis; and 2) hydration stresses, although, there are others like: Capillary effects, dehydration, differences in pressure and cationic exchange. These factors are not present generally in independent form. At "Piedemonte Llanero" the problem of the wellbore stability represents a high spending of money for oil companies, caused in this region by chemical factors between fluid/rock and mechanical factors as resulted of the stresses in the area. Metil Blue Testing (MBT) and X-ray Diffraction (DR-X) were made in samples of clay; these were taken from cuts extracted of boreholes drilled in some places of the Colombian Llanos. It was found that these samples had a moderate content of reactive and low content of swell minerals. The samples main component was kaolinite, this mineral does not let the rock get swell, but it produces caving in the hole. However, it is necessary to do other tests to quantify the damages and evaluate the influence of the regime of the stress during the perforation of wellbore.

Keywords: Wellbore, Instability, Clay minerals, "Piedemonte Llanero".

¹ Consultants geologist of Colombian Petroleum Institute and HOCOL Petroleum Limited. amorocho.ricardo@gmail.com

² Geologist, juanbadillor@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

A pesar de los grandes progresos registrados en el área de la estabilidad de pozos, con mucha frecuencia, aún se siguen reportando problemas durante la perforación de pozos petroleros, los cuales inician con la fragmentación de las paredes del hueco, la transferencia de fragmentos de roca al anular y culminan en situaciones críticas como la reducción del hueco, pega de tuberías, derrumbes y en el peor de los casos la pérdida total del pozo (Lingdong *et al.*, 2011; Adesoye, 2009). Para minimizar estos problemas durante la perforación las empresas utilizan lodos de perforación. El lodo de perforación es una mezcla de diferentes componentes. Cada componente es agregado con el fin de mejorar ciertos aspectos como soporte del hueco, capacidad de arrastre, invasión de filtrado, daño a la formación, control de presión, suspensión de ripios, etc. En la industria petrolera el término *shale* es utilizado en sentido más amplio para incluir todas las rocas sedimentarias de grano fino con alguna cantidad de mineral arcilloso presente, al igual que el nombre de lutita (Amarocho, 2003; Moreno y Antolinez, 1989).

La composición mineralógica de la fase arcillosa varía ampliamente con el tipo de *shale*. La illita, esmectita, caolinita y clorita son los minerales más comunes en los *shales*. La estabilidad de las formaciones arcillosas durante su perforación depende de la actividad química de los *shales*, la cual es controlada por factores como el porcentaje de minerales arcillosos hidratables presentes en las rocas, el grado de saturación, el coeficiente de actividad, los procesos de intercambio catiónico entre el lodo y la roca, y la separación de las partículas de arcilla en el *shale* (Guizhong *et al.*, 2003; Simpson and Dearing, 2000; Fam and Dusseault, 1999; Roy and Cooper, 1993; Moreno y Antolinez, 1989; Cress, 1983; Rodríguez y Bravo, 1976; Bol and Wong, 1974). Mediante ensayos de MBT y DRX, se caracterizaron mineralógicamente algunas muestras de arcillas de ripios de perforación, de las Formaciones (de base a techo) Carbonera (miembro superior), León, Guayabo y Necesidad, procedentes del piedemonte de los Llanos, para determinar su posible comportamiento durante la perforación.

GENERALIDADES

Este trabajo se realizó con muestras de lodo procedentes de pozos perforados en los Llanos Orientales (FIGURA 1). La Cuenca de los Llanos se caracteriza por estar limitando con la cordillera de los Andes y por tener un cinturón plegado y fallado hacia el frente de montaña y por hacerse más profundas hacia el Occidente y más someras hacia el escudo granítico de Guyana

al Oriente de la Cuenca (McCollough and Carver, 1989, en Torrado, 2000). La cuenca es una depresión topográfica orientada SSW-NNE que se desarrolla en el flanco Occidental del Escudo de la Guyana, por tal razón los menores espesores se observan hacia la parte más Oriental de la cuenca. Estos registros de rocas están representando secuencias con ciclos de sedimentación de relleno marginal (Paleozoico Inferior) y un interior fracturado (Paleozoico Superior-Terciario). Los ambientes predominantes iniciales corresponden a barras fluviales, rellenos de canal y canales deltaicos durante el Cretácico (Govea-Rodríguez y Aguilera, 1985), seguidos por ambientes continentales en el Terciario y reciente (Pérez, 1985).

Actualmente en la industria petrolera se utiliza la nomenclatura usada por Notestein (1944; en Torrado, 2000) en la antigua concesión Barco. Provisionalmente se utiliza esta nomenclatura debido a su uso habitual entre las compañías petroleras aunque sus límites cronoestratigráficos no coinciden en los Llanos (Torrado, 2000). A continuación se da una breve descripción de base a techo de las formaciones de interés en el presente trabajo (FIGURA 2). La Formación Carbonera del Mioceno Temprano, consta principalmente de arcillolitas grises moteadas alternando con areniscas grises y verdosas, y limolitas grises, abundantes niveles de carbón con restos vegetales, su espesor supera los 1.000 m y se considera de ambiente marino y fluvio-marino; suprayaciendo la Formación Carbonera se encuentra la Formación León, la cual está constituida por un *shale* gris y pardo, moteado, con niveles de areniscas arcillosas, con un espesor aproximado de 1.000 m y de ambiente transicional a marino; suprayaciendo la Formación León se encuentran la Formación Guayabo, compuesta por unas arcillolitas abigarradas y lutitas pardas y grises con intercalaciones de arenisca arcillosa en parte conglomerática, con espesor aproximado de 1.200 m; seguido de esta y en el tope del Terciario, se encuentran la Formación Necesidad, que son arcillolitas varicoloreadas y areniscas arcillosas finas, con espesor aproximado de 200 m; para éstas formaciones se ha propuesto un ambiente fluvial con alto aporte de sedimentos provenientes de la Cordillera Oriental. Los cuerpos cuaternarios son aluviones y terrazas aluviales que forman una cobertera de meteorización sobre la zona. La cuenca también ha sido definida como de tipo *Foreland*, donde las rocas reservorio de aceite están constituidas por areniscas de edades Cretácico y Terciario, de ambientes de depositación deltaico a marino, en zonas con plegamientos y fallas antitéticas (Acevedo y Hernández, 2004; Torrado, 2000).

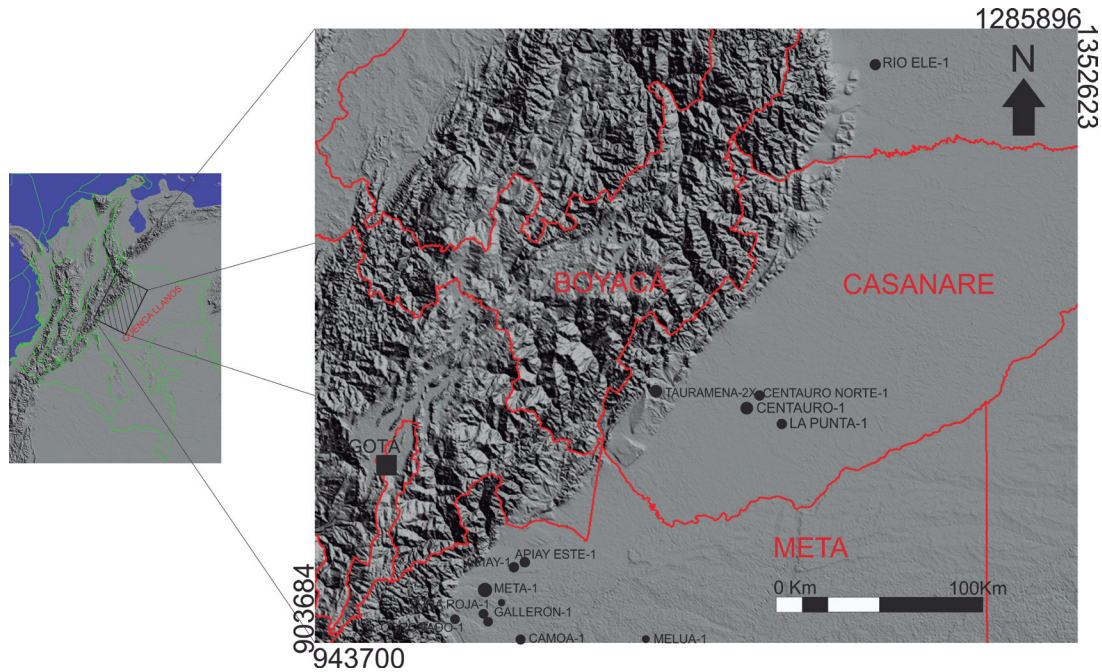


FIGURA 1. Ubicación de los pozos perforados en la Cuenca de los Llanos Orientales

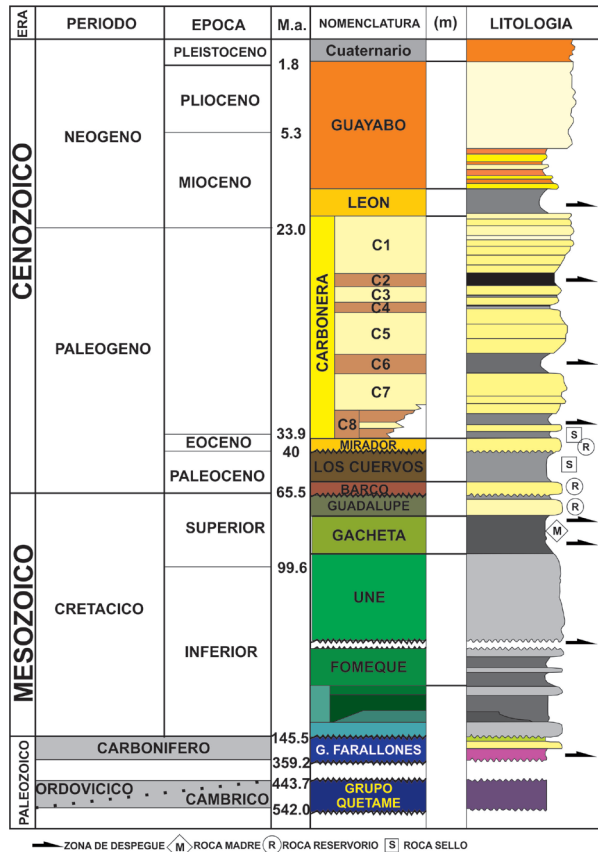


FIGURA 2. Columna estratigráfica de la Cuenca de los Llanos Orientales. Modificado de Acevedo y Hernández, 2004

Las publicaciones destacadas sobre el comportamiento de las arcillas durante la perforación de pozos petroleros son las de Adesoye (2009), Fam and Dusseault (1999), Moreno y Antolinez (1989), Bol and Wong (1974), quienes afirman que las arcillas más sensibles al agua son las montmorillonitas, illitas y variedades intercaladas, las cuales pueden constituir hasta el 80% del peso de la lutita y son responsables de la mayoría de los problemas de inestabilidad encontrados en las paredes del pozo, porque cuando están en contacto con agua se hidratan. También Simpson and Dearing (2000), Roy and Cooper (1993), Brandon *et al.* (1992), Cress (1983), Kubacki (1981), afirman que cuando la caolinita entra en contacto con el agua se dispersa. Para Fam and Dusseault (1999) la alta superficie específica de *shales* esmectíticos (Sa aprox. 100 m²/gr) son el principal factor en el hinchamiento cuando entran en contacto con agua y por el contrario los *shales* cuarzo illíticos son considerados generalmente como no hinchables. Los principales problemas para mantener la estabilidad de los *shales* durante su perforación se presentan al tratar de mantener las propiedades químicas y físicas *in situ* de la roca, tomando en cuenta que si esto no se satisface se provoca la inestabilidad de las paredes del pozo.

METODOLOGÍA

Se buscaron pozos petroleros perforados en el área de interés en la base de datos de la litoteca del Instituto Colombiano del Petróleo (FIGURA 1; TABLA 1), posteriormente se

analizaron las curvas de los registros compuestos de dichos pozos con el fin de localizar los horizontes de interés y los intervalos a muestrear; se extrajeron 50 gr de muestra de lodo de ripios de perforación (zanja seca) de los intervalos

de interés, y se realizó una tabla con el nombre del pozo, su ubicación geográfica (X, Y), el nombre de la formación a la cual pertenece y el ensayo de laboratorio realizado (TABLA 1).

TABLA 1. Listado de pozos con sus respectivos ensayos.

POZO	X	Y	DEPARTAMENTO	FORMACIÓN	ENSAYO
APIAY ESTE - 1	1075000 - 1080000	945000-940000	META	GUAYABO LEÓN	MBT DRX-MBT
AOIAY - 13	1075000 - 1080000	945000-940000	META	GUAYABO	MBT
COMOA - 1	1060000	900000	META	LEÓN CARBONERA CARBONERA	MBT MBT MBT
CENTAURO NORTE - 1	875000	1040000	CASANARE	GUAYABO LEÓN CARBONERA MBT	MBT MBT
CORONADO -1	1030000-1050000	920000-900000	META	NECESIDAD NECESIDAD GUAYABO CARBONERA	MBT MBT MBT MBT
GALERON - 1	1050000-1055000	915000-910000	META	GUAYABO CARBONERA	DRX-MBT MBT
LA PUNTA - 1	885000-89000	1025000-1020000	CASANARE	GUAYABO LEÓN	MBT DRX-MBT
LUNA ROJA - 1	1064071	916828	CASANARE	CARBONERA	MBT
MELUA-1	1145000	900000-895000	META	NECESIDAD NECESIDAD	MBT MBT
META -1	1060000 - 10740000	920000-940000	META	CARBONERA CARBONERA	MBT MBT
RIO ELE-1	940000	1235000	ARAUCA	GUAYABO LEÓN	DRX-MBT MBT
TAURAMENA - 2X	1150000	1045000	CASANARE	GUAYABO LEÓN CARBONERA	MBT MBT DRX-MBT

Se realizaron ensayos de *Metil Blue Testing* (MBT) en 43 muestras de lodos extraídos de 12 pozos perforados en el piedemonte y en los Llanos Orientales colombianos. Este trabajo se realizó en el laboratorio de lodos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Las muestras se prepararon de la siguiente forma: Las de lodo fueron maceradas en un mortero de ágata hasta llevarla a polvo, seguido se pasaron por un tamiz malla 200; con el material obtenido después del tamizaje se pesó 0.57 gr por muestra en una balanza electrónica. Este material se colocó por separado en un *erlenmeyer* de 50 ml y se le agregó 15 ml de peróxido de hidrógeno, 15 ml de agua destilada y 0.5 ml de ácido sulfúrico por cada muestra, se mezcló y se puso en calentamiento durante 10 min aproximadamente, sin dejar permitir que se vaporara la muestra; se dejó enfriar a temperatura ambiente y se adhirió agua destilada hasta completar 25 ml, luego se procedió a titular con azul de metileno, se agitaba por 30 seg y se procedía a colocar una gota en

un papel filtro, esta última parte se repitió hasta alcanzar el punto final. Este proceso final se repitió con cada una de las 43 muestras. Los mililitros de azul de metileno requeridos para alcanzar el punto final de la titulación se multiplicaron por 2.85, factor sugerido en la norma API RP 13B para trabajos con muestras de arcillas. Los resultados fueron tabulados y graficados con el fin de ilustrar la reactividad de las muestras -tendencia al hinchamiento y dispersión durante el contacto con agua- (Petkovšek *et al.*, 2010). Bustos y Enoc (1967), sugieren que para muestras de arcilla se debe tener en cuenta la siguiente escala, de acuerdo a los valores en mili equivalentes (meq) de MBT:

- 0 – 7 Arcillas de muy baja y baja reactividad
- 8 – 14 Arcillas de moderada reactividad
- 15 y más Arcillas reactivas

Se realizaron ensayos de Difracción de Rayos X (DR-X) en cinco muestras de lodo. Las muestras se

seleccionaron por su respuesta a las pruebas MBT. Estas formaciones son la Formación Guayabo con dos muestras que tienen una respuesta moderadamente alta a la reactividad con agua. Dos muestras de la Formación León que también muestran un gran aumento en la reactividad con agua. Una muestra de la Formación Carbonera que se eligió por estar a la mayor profundidad (TABLA 1). Los ensayos se realizaron en los laboratorios de DR-X de la UIS (Equipo marca Rigaku, con fuente de rayos X de Cu) y del ICP (Equipo marca Siemens, D500, equipado con lámpara de Cu). Se hicieron mediciones de muestra Bulk y en fracción arcilla (<2µm). La separación de la fracción arcilla se realizó mediante el siguiente procedimiento: se tomaron 50 gr de cada muestra de lodo y se procedió a tamizarlas con una malla 400-mesh, se hizo un análisis con HCl para descartar la presencia de carbonatos, posteriormente, se procedió a pesar 20 gr de la muestra tamizada y se colocaron en un vaso de precipitado de 750 ml, al cual se le adicionó agua destilada hasta completar 500 ml y se colocó en agitación por medio de una barra magnética en un agitador magnético; se le agregó pirofosfato de sodio para ayudar a dispersarla y se agitó durante 15 min, seguido se dejó reposar por 24 h., se agitó de nuevo y reposa por 30 min. Luego se separó el residuo en suspensión del decantado; el residuo en suspensión es colocado en una probeta de 1000 ml, y se le agregó agua destilada hasta completar dicho volumen, se dejó reposar por 26 h., según la Ley de Stokes para tamaño menor a 2µ. Pasado este tiempo, se drenó la fracción en suspensión de la parte superior de la probeta (300 ml aprox.) y se pasó a un recipiente limpio.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de MBT de cada una de las 43 muestras analizadas se observan en la TABLA 2. Los resultados de MBT también fueron graficados en diagramas de dispersión para mostrar su comportamiento en la cuenca de los llanos. se observa como las muestras de la Formación León son más reactivas en comparación con las muestras de las formaciones Carbonera y Guayabo, lo cual está relacionado con el ambiente de sedimentación, tomando en cuenta que a la Formación León se le atribuyen ambientes pantanosos transicionales y marinos (Torrado, 2000). Además, los datos en las muestras tomadas de los pozos ubicados al nororiente se encuentran entre el intervalo de 10 – 16 para las formaciones Guayabo y Carbonera, en contraste con los valores obtenidos en las muestras tomadas de los pozos ubicados al suroriente los cuales están entre 4 – 22 (FIGURA 3).

TABLA 2. Resultado de MBT para cada una de las muestras analizadas.

RESULTADOS ENSAYOS MBT			
FORMACIÓN	POZO	V-MBT (ml)	VALOR (*2,85)
NECESIDAD	MELUA-1	2	5,7
NECESIDAD		2	5,7
NECESIDAD	CNADO-1	2	5,7
NECESIDAD		4	11,4
GUAYABO	MELUA-1	3	8,55
GUAYABO	CNADO-1	4	11,4
GUAYABO	TMENA-2X	5	14,25
GUAYABO	GALERON-1	3	8,55
GUAYABO		4	11,4
GUAYABO		4	11,4
GUAYABO	LA PUNTA -1	3,5	9,975
GUAYABO		3	8,55
GUAYABO		4	11,4
GUAYABO	APIAY-13	6	17,1
GUAYABO	APIAY E-1	4,5	12,825
GUAYABO		6,5	18,525
GUAYABO	CN-1	5	14,25
GUAYABO	RIO ELE-1	3,5	9,975
LEÓN	CAMOA-1	7	19,95
LEÓN		7,5	21,375
LEÓN	APIAY-13	6,5	18,525
LEÓN	APIAY E-1	7	19,95
LEÓN	LA PUNTA -1	6	17,1
LEÓN		6	17,1
LEÓN		5,5	15,675
LEÓN	TMENA-2X	4,5	12,825
LEÓN	CN-1	6,5	18,525
LEÓN	RIO ELE-1	4	11,4
CARBONERA	CNADO-1	4,5	12,825
CARBONERA	GALERON-1	3,5	9,975
CARBONERA		5	14,25
CARBONERA	CAMOA-1	5	14,25
CARBONERA		7,5	21,375
CARBONERA		5	14,25
CARBONERA		5	14,25
CARBONERA	META-1 3	8,55	
CARBONERA		3	8,55
CARBONERA	CAMOA-1	7	19,95
CARBONERA		2	8,7
CARBONERA		6	17,1
CARBONERA	LUNA ROJA-1	6	17,1
CARBONERA	CN-1	4,5	12,825
CARBONERA	TMENA-2X	4	11,4

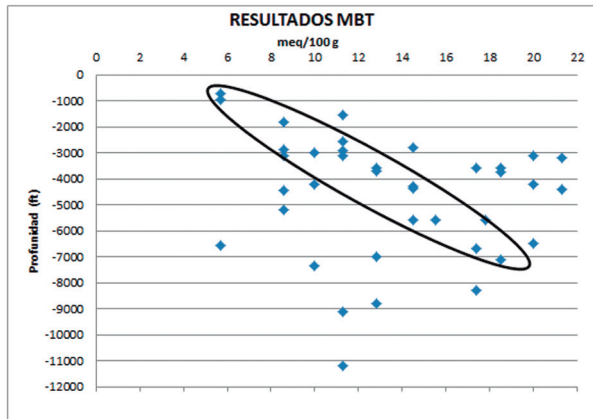


FIGURA 3. Resultados MBT.

La reactividad en las muestras tiene una tendencia a aumentar con la profundidad. Estas tendencias pueden estar relacionadas con cambios en el nivel de base, tomando en cuenta las variaciones laterales y verticales de las respectivas asociaciones de facies

para cada una de las formaciones estudiadas (Torrado, 2000). Aunque no se mide el efecto de precipitación por diagénesis de minerales arcillosos. De las cinco muestras seleccionadas tres fueron analizadas en el laboratorio de Rayos X de la UIS y las dos restantes en el laboratorio de Rayos X del ICP. Los resultados *Bulk* y fracción arcilla para cada muestra se presentan integrados en la TABLA 3. Estos resultados permiten identificar como la illita y la caolinita ocupan entre el 70 y 80% de la muestra, siendo los dos principales especies minerales dentro de las muestras. La caolinita es un mineral que se forma en depósitos con un avanzado estado de meteorización química y la illita puede formarse a partir de la alteración de la montmorillonita. Esto implica que las formaciones lodosas en el sector del piedemonte y los llanos tienden a sufrir principalmente problemas de dispersión generando derrumbes durante la perforación del pozo. Aunque la montmorillonita con una presencia superior al 10% empieza a generar problemas de hinchamiento en las paredes del pozo (Moreno y Antolinez, 1989).

TABLA 3. Resultados *Bulk* y fracción arcilla para cada muestra.

POZO	RESULTADOS DE DR-X (%)						
	CAOLINITA	ILLITA	MONTMORILLONITA	CLORITA	CALCITA	YESO	HEMATITA
GALERÓN-1	36,7	38,4	20,2	0	0	0	4,7
RÍO ELE-1	49	25	25	1	0	0	0
APIAY ESTE-1	34	57,1	7,1	0	0	0	1,8
LA PUNTA-1	50	35,1	13,8	1,1	0	0	0
TAURAMENA-2X	38	52,8	64	0	2,8	0	0

DISCUSIÓN

En los resultados de DRX se puede observar como en las muestras de los pozos La Punta-1 correspondiente a la Formación León, Río Ele-1 y Galerón-1 correspondientes a la Formación Guayabo, el contenido de montmorillonita estuvo por encima del 10%, y los resultados de MBT fueron 17.1, 19.95 y 11.4 meq/100 gr, respectivamente, lo cual indica que la reactividad en las dos primeras está ligada a la presencia de éste mineral junto al importante contenido de caolinita, tomando en cuenta que está por alrededor del 50%. En la muestra del pozo Galerón-1 se observa un gran contenido de montmorillonita, comparado con las demás muestras, pero en los resultados de MBT se encontró una reactividad moderada, lo cual se relaciona con el bajo contenido de caolinita, esto indica que la reactividad también depende de las relaciones entre minerales como la montmorillonita y caolinita o caolinita e illita. En las

muestras del pozo Apiay Este-1 correspondientes a la Formación León y Tauramena 2X correspondiente a la Formación Carbonera, los resultados de DRX mostraron un mayor contenido de illita, con resultados de MBT 9.975 y 11.4 respectivamente, esto indica que las rocas con altos contenidos de illita tenderán a presentar reactividades entre moderadas y bajas (Fam and Dusseault, 1999).

Con los resultados en los ensayos de MBT, se encontró el mayor valor (21.4) en dos muestras del pozo Camoa-1, el primero correspondiente a la Formación León y el último a la Formación Carbonera, mostrando que en éstos intervalos las concentraciones de montmorillonita y caolinita, representan alrededor del 60% de la fracción arcilla. Esto también fue observado en las muestras de los pozos La Punta-1 y Río Ele-1, donde la difracción de rayos X confirmó la presencia de estos minerales. El comportamiento esperado en

las formaciones lodosas durante la perforación es un hinchamiento en las etapas iniciales de hidratación finalizando con derrumbes de las paredes del pozo, este comportamiento podría ocurrir también en las muestras de los pozos Camoa-1, Apiay 13, Apiay Este-1, La punta-1 y Centauro Norte-1, donde los valores de MBT estuvieron por encima de 17 meq/100 gr, para la Formación León y un intervalo de la Formación Guayabo.

La información obtenida en el presente trabajo podría ser complementada con datos sobre hinchamiento, dispersión de arcillas, difusión de presión de poro, plasticidad, efectos capilares y osmosis que se pueden generar en estas formaciones durante la perforación de un pozo petrolero. Estos resultados con posibles ambientes de depositación, de acuerdo a las investigaciones de Grim (1962), éste autor de acuerdo a sus investigaciones concluye que un mineral como la caolinita se forma en mayor proporción en ambientes continentales y costeros; minerales como la montmorillonita e illita predominantemente se forman en ambientes marinos. Esto significa que formaciones como Carbonera y León tuvieron gran influencia marina, aunque por los contenidos de caolinita que presentan también hubo influencia continental.

CONCLUSIONES

La reactividad de una muestra no es el resultado de la presencia de un solo tipo de mineral arcilloso, sino de la combinación de dos o más minerales, sin tener en cuenta la acción de los demás solutos disueltos en el lodo de perforación (Yu *et al.*, 2003).

Los resultados de MBT para las 43 muestras indican que las muestras analizadas tienden a poseer una reactividad moderada, pero se necesitan más pruebas de laboratorio como ensayos de hinchamiento y dispersión para cuantificar de una forma más exacta su reactividad.

Los valores de reactividad están relacionados con la presencia de ciertos tipos de minerales en conjunto y de las proporciones a las cuales se encuentren en la muestra, como lo son la presencia de caolinita junto a la montmorillonita o illita.

La illita en mayor concentración dentro de la muestra, en comparación con la caolinita y la montmorillonita, representa valores de reactividad moderados a bajos.

La Formación León en la región del piedemonte y los llanos presenta la mayor reactividad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración y sugerencias realizadas por el Geólogo Francisco Velandia, también al Geólogo Sait Khurama, profesores de la Escuela de Geología de la UIS y parte del Comité Editorial, así como a un evaluador anónimo por sus aportes. Además, agradecen la colaboración de los laboratorios de DR-X de la Escuela de Química y de Preparación de Lodos de la Escuela de Ingeniería de Petróleos de la Universidad Industrial de Santander (UIS). También al Ing., Néstor F. Saavedra, director del grupo de investigación Wellbore Stability, adscrito a la Escuela de Ing. de Petróleos (UIS), por su colaboración durante la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Acevedo, R., y Hernández, Y. 2004. Modelamiento y Análisis Estructural del Anticlinal de Medina, Piedemonte de los Llanos Orientales. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Bucaramanga. Trabajo de Grado, 135p.
- Adesoye, K. 2009. Shale Characterization for Evaluating Shale-Drilling Fluid Interaction. University of Oklahoma. Master of Science Thesis, 122p.
- Amoroch P.R. 2003. Análisis de la Interacción Química entre los Fluidos de Formación, Perforación y Composición Mineral de Rocas Arcillosas en la Estabilidad de Pozos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología. Trabajo de grado, 94p.
- Bol, G.M., and Wong S.W. 1974. Borehole Stability in Shales. Article SPE 24975. 444 (1920): 161-184.
- Brandon, B.D., Cerkovnik, J., Eastman, C., Koskie, E., Colston, F., Anderson, M.E., Hollister, K.T., Senger, J., and Niemi, R. 1992. Development of a New IADC Fixed Cutter Drill Bit Classification System. SPE Paper No. 23940. SPE/IADC Drilling Conference, 841p.
- Bustos, D.E., y Enoc, O. R. 1967. Restauración Teórico – Práctica del Laboratorio de Lodos y Cementos. Escuela de Ingeniería de Petróleos. UIS, 98p.
- Cress, L.A. 1983. How and When To Run a PDC Bit in the Upper Texas Gulf Coast-An Operator's Viewpoint. SPE Paper No. 11388 presented at the IADC/SPE 1983 Drilling Conference, 255p.
- Fam, M.A., and Dusseault, M.B. 1999. Borehole Stability In Shales: A Physico-Chemical Perspective. Article SPE 47301: 461-463.

- Govea-Rodriguez, C., y Aguilera, H. 1985. Cuencas Sedimentarias en Colombia. II simposio Bolivariano de Cuencas Subandinas. ACGGP, Bogotá, pp. 1-93.
- Grim, E. R. 1962. Clay Mineralogy. New York, 422p.
- Guizhong C., Martin E. C., Mukul M. S., and Mengjiao Y. 2003. A Study of Wellbore Stability in Shales Including Poroelastic, Chemical, and Thermal Effects. Journal of Petroleum Science and Engineering, 38: 167-176.
- Kubacki, W. 1981. Alteración de la Caolinita como la Causa de la Reducción de Permeabilidad Natural de la Formación. Instituto de Investigaciones Petroleras. Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. Maracaibo, Venezuela, 10p.
- Lingdong L., Yuanfang C., Yuting Z., Qing C., and Fengkun Z. 2011. A Fluid-Solid Coupling Model of Wellbore Stability for Hydrate Bearing Sediments. Procedia Engineering, 18: 363-368.
- Moreno, R.H., y Antolinez, V. 1989. Análisis del Lodo Polímetro Ez-Mud para Estabilidad de Lutitas. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Bucaramanga. Trabajo de Grado, 115p.
- Pérez, V. 1985. The Apiay Block, Llanos Basin. II Bolivarian Symposium Oil Exploration in Subandean Basin. Part Two. Geological Field Trips Colombia (1980). Ecopetrol, pp. 213- 229.
- Petkovšek, A., Maček, M., Pavšič, P., and Bohar F. 2010. Fines Characterization Through the Methylene Blue and Sand Equivalent Test: Comparison with other Experimental Techniques and Application of Criteria to the Aggregate Quality Assessment. Bull Eng Geol Environ, 69 (4): 561-574.
- Rodríguez, R., y Bravo, M. 1976. Estudio de la Inestabilidad de las Lutitas durante la Perforación. Tesis de Grado. Escuela de Ingeniería de Petróleos, UIS, pp. 20-24.
- Roy, S., and Cooper, G, A. 1993. Prevention of Bit Balling in Shales: Some Preliminary Results. Article SPE 23870, 8 (3): 195-200.
- Simpson, J.P., and Dearing, H. L. 2000. Diffusion Osmosis-An Unrecognized Cause of Shale Instability. SPE, O' Brien-Goins-Simpson and Associates, Inc. Article SPE 59190. IADC/SPE Drilling Conference, pp. 14.
- Torrado, E.C. (2000). Compilación Detallada y Análisis de la Informaciones Estratigráfica, Geoquímica y Bioestratigráfica Existente sobre la Cuenca de los Llanos Orientales, Colombia. UIS. Escuela de Geología. Tesis de Grado, 238p.
- Yu M., Chenevert M., and Sharma M. 2003. Chemical-Mechanical Wellbore Instability Model for Shales: Accounting for Solute Diffusion. Journal of Petroleum Science and Engineering, 38: 131-143.

Trabajo recibido: Enero 17 de 2011
Trabajo aceptado: Febrero 3 de 2012